

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARIO JANCETIĆ

POSTUPAK ZASIĆIVANJA
SITNOZRNATOG TLA U HIDRAULIČKOM
EDOMETRU

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

POSTUPAK ZASIĆIVANJA
SITNOZRNATOG TLA U HIDRAULIČKOM
EDOMETRU

KANDIDAT:

MARIO JANCETIĆ

M. Jancetić

MENTOR:

doc. dr. sc. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2017.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: MARIO JANCETIĆ

Matični broj: 2505 - 2014./2015.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

POSTUPAK ZASIĆIVANJA SITNOZRNATOG TLA
U HIDRAULIČKOM EDOMETRU

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Osnovne osobine čestica tla
3. Tlak porne vode uzrokovan promjenom naprezanja
4. Hidraulički edometar
5. Zaključak
6. Literatura
7. Popis slika
8. Popis tablica

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 20.03.2017.


Rok predaje: 08.09.2017.

Mentor:


Doc.dr.sc. Igor Petrović



Predsjednik Odbora za nastavu:


Doc.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

Postupak zasićivanja sitnozrnatog tla u hidrauličkom edometru

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc. dr. sc. Igora Petrovića**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 6.9.2017. godine

Mario Jancetić

(Ime i prezime)

37595955006

(OIB)

M. Jancetić

(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Mario Jancetić, Postupak zasićivanja sitnozrnatog tla u hidrauličkom edometru

Edometar je vrlo često korišteni laboratorijski uređaj kojim se sprječavaju horizontalne deformacije tla i u tim se uvjetima ispituje stišljivost tla. U njega se ugrađuje neporemećeni uzorak tla koji se ispituje pod različitim inkrementima opterećenja. U pravilu je svaki sljedeći increment opterećenja dvostruko veći od prethodnog. U hidrauličkom edometaru se za razliku od klasičnog edometra:

- za nanošenje opterećenja na uzorak ne koriste utezi već se opterećenje na uzorak nanosi putem hidrauličke pumpe
- vrši mjerenje i regulacija pornog pritiska putem druge hidrauličke pumpe

Hidraulički edometrom možemo upravljati putem računala ili ručno.

U ovom završnom radu je, na uzorku zaglinjenog pijeska, demonstriran postupak zasićivanja uzorka u hidrauličkom edometru. Stupanj zasićenosti uzorka utvrđen je temeljem Skemptonovog parametra B . Kada parameter B poprimi veću vrijednost od 0,95 može se smatrati da je uzorak u potpunosti zasićen.

Ključne riječi: hidraulički edometar, zasićeno tlo, porni tlak, ćelijski pritisak, Skemptonovi parametri

Sadržaj

1. UVOD	7
2.OSNOVNE OSOBINE ČESTICA TLA	2
2.1.Trodjelni sustav	2
2.1.1. Gustoća.....	2
2.1.2. Porozitet	3
2.1.3. Vlažnost tla	4
2.1.4 Stupanj zasićenosti	4
2.1.5. Obujamska težina	5
2.2. Klasifikacija tla	6
2.2.1. Granulometrijski sastav.....	7
2.2.2. Atterbergove granice	9
3. Tlak porne vode uzrokovan promjenom naprezanja	10
4.Hidraulički edometar.....	12
4.1. Dijelovi hidrauličkog edometra.....	14
4.2. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar	15
4.3. Rezultati ispitivanja.....	18
5. Zaključak.....	21
6. Literatura	22
7. Popis slika	
8. Popis tablica	

1. UVOD

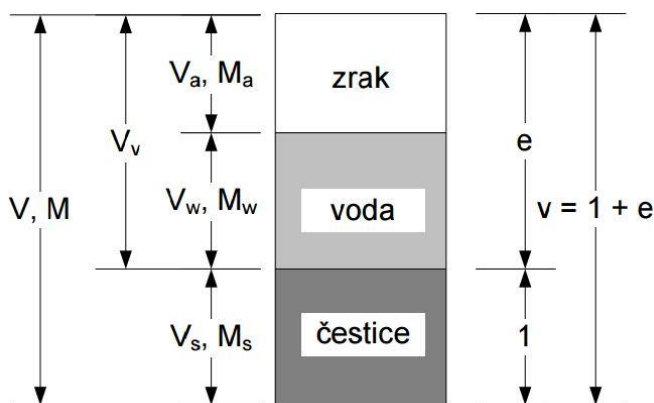
Tlo je nastalo kao posljedica rastrošbe Zemljine kore pod utjecajem atmosferilija. Kao što voda kruži u prirodi, tako se isto može promatrati kruženje stijena koje tvore Zemljinu koru. Razlika je jedino u vremenskom razdoblju promatranja pojave.

Očvrsla stijenska masa onog trenutka kada se pojavi na površini Zemljine kore, dolazi pod utjecaj atmosferilija. Atmosferilije je skupno ime za činioce koji utječu na rastrošbu stijenske mase, a što je početak tvorevine koje se naziva tlo. Rastrošba započinje djelovanjem tektonskih sila koje svojim utjecajem deformiraju osnovnu stijensku masu do trenutka dok unutar stijenske mase ne dođe do prekoračenja čvrstoće i stvaranja prvih pukotina. Ovo se najčešće dešava duž rasjeda. Zatim se stijena dalje lomi na manje blokove. Kada blokovi postanu omeđeni pukotinama sa svih strana, dolazi do pomaka blokova i otvaranja pukotina. U pukotine, ma kako one bile uske, čak i prsline, ulazi voda i tu počinje utjecaj atmosferilija na rastrošbu stijene. Temperaturne razlike uvjetuju širenje i skupljanje stijena izloženih intenzivnoj insolaciji. Najčešća podjela čimbenika rastrošbe je na: mehaničke (tektonske sila, voda, led, abrazija i vegetacija) i kemijske (oksidacija, karbonizacija, hidratacija, desilikacija, otapanje). Nakon rastrošbe slijedi prijenos sitnijih čestica stijene. U čimbenike prijenosa ubraja se: gravitacija, voda, vjetar, led [1].

2.OSNOVNE OSOBINE ČESTICA TLA

2.1.Trodjelni sustav

Razmatrajući način taloženja čestica, a što je završni proces stvaranja tla, uočljivo je da se ono sastoji od čestica različite krupnoće i od međuprostora pora. Pore u tlu mogu biti ispunjene vodom i/ili zrakom. Rijetko kada se u prirodi može naći tlo u kojem se pore ispunjene isključivo zrakom. Iz tog se razloga govori o trodjelnom sustavu u tlu: čvrste čestice, voda i zrak (Slika 1) [1].



Slika 1. Trodjelni sustav

Promatra li se jedinična zapremina tla u prirodi, teoretski se može u toj zapremini odvojiti zapremina čvrstih čestica i zapremina šupljina i pora. Zapremina pora se može podijeliti na dio pora ispunjen vodom i dio pora ispunjen zrakom. Trodjelni sustav tla ima određene osobine koje su vezane za opisane zapremnine, a o kojima ovise osobine tla [1].

2.1.1. Gustoća

Gustoća je jedna od osnovnih veličina koje opisuju mehaničke karakteristike svakog materijala. Definira se kao masa jediničnog volumena materijala. Tako jedan kubni metar vode ima masu od oko 1 Mg, a 1 cm³ vode ima masu od 1 g pa je gustoća vode w

$= 1 \text{ Mg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$. Između prve i druge jedinice za gustoću vode, treba preferirati prvu jedinicu, u skladu s međunarodnom konvencijom o mjernim jedinicama [3].

Gustoću u mehanici tla definiramo za pojedine faze, osim zraka, koji ima zanemarivu masu, i za cijeli element tla. Tako definiramo gustoću vode w i gustoću zrna i čestica s iz [3]:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V} [\text{g/cm}^3] \text{ (izraz 1.)}$$

$$\rho_w = \frac{M_w}{V} [\text{g/cm}^3] \text{ (izraz 2.)}$$

Gustoća čvrstih čestica se u geotehničkom laboratoriju određuje pomoću staklene vatrostalne posude poznatog volumena koju nazivamo piknometar.

Gustoća čvrstih čestica u tlu kreće se u relativno uskim granicama, obično između 2,65 i 2,75 Mg/m^3 [3].

Gustoću tla računamo pomoću formule:

$$\rho = \frac{M}{V} [\text{g/cm}^3] \text{ (izraz 3.)}$$

2.1.2. Porozitet

Porozitet (n , apsolutni porozitet) je omjer zapremine pora i ukupne zapremine. Izražava se u postocima. Koristi se za proračun gustoće tla, dok se koeficijent pora (e) upotrebljava kod analiza slijeganja s razloga što je to onaj dio tla unutar kojeg se deformacija i odvija [1].

Koeficijent pora (e , relativni porozitet) je omjer zapremine pora i zapremine čvrstih čestica. Izražava se pomoću decimalnog broja, a može biti i veći od 1. Orientalno se može reći da je tlo pogodno za temeljenje ako ima relativni koeficijent pora $e \leq 0,5$, a nepovoljno ako je $e > 1,0$

$$e = \frac{V_p}{V_s} \cdot 100 [\%] \text{ (izraz 4.)}$$

$$n = \frac{V_p}{V} \cdot 100 \text{ (izraz 5.)}$$

Apsolutni i relativni porozitet su u međusobnom odnosu i možemo ga prikazati pomoću izraza:

$$n = \frac{e}{1 + e} \text{ (izraz 6.)}$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \text{ (izraz 7.)}$$

2.1.3. Vlažnost tla

Vlažnost tla je jedno od osnovnih svojstava tla koje se utvrđuje u laboratoriju za svaki uzorak tla, budući da voda ima značajan utjecaj na mehaničko ponašanje tla. Označava se simbolom w i definira kao odnos mase vode M_w i mase čvrstih čestica M_s u uzorku tla:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100 [\%] \text{ (izraz 8.)}$$

Vlažnost se određuje tako da se uzorak vlažnog tla naprosto izvaže (odredi mu se masa M), zatim se osuši u peći na 105 °C u trajanju od oko 24 sata, pa se ponovo izvaže da bi se dobila masa suhog uzorka M_d (indeks d je od engleskog „dry“), koja je jednaka masi čvrstih čestica M_s u uzorku. Kako je razlika mase vlažnog i mase suhog uzorka tla jednaka masi vode u uzorku, $M_w = M - M_s$, izračun vlažnosti slijedi iz izraza (8.). Vlažnost se izražava u postocima. Za dobivanje prirodne vlažnosti tla, one koju je tlo imalo in-situ (na terenu), prije vađenja uzorka, izvađeni je uzorak potrebno posebno zaštititi kako ne bi izgubio vodu isparavanjem, a u laboratoriju ga prije ispitivanja treba čuvati u vlažnoj komori [3].

2.1.4 Stupanj zasićenosti

Stupanj zasićenosti (S_r) je omjer volumena vode (V_w) i volumena pora (V_p) u uzorku, odnosno on definira koliki je dio volumena pora ispunjen vodom. Naziva se još i stupanj saturacije ili stupanj zasićenja, a izražen je u postocima:

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \cdot 100 \% \text{ (izraz 9.)}$$

Teoretski se vrijednosti stupnja zasićenosti kreću u rasponu od $S_r = 0$ (0 %) kada je tlo potpuno suho, do $S_r = 1$ (100 %) kada je tlo potpuno saturirano vodom, odnosno kada su sve njegove pore ispunjene vodom. Djelomično zasićeno tlo je ono tlo kod kojeg voda ne ispunjava sve njegove pore već dio pora ispunjava i zrak, a stupanj saturacije je $0 < S_r < 100 \%$. Važno je napomenuti da u prirodi nema potpuno suhog tla, međutim ono se može dobiti nakon sušenja u laboratorijskom sušioniku i upotrebljava se za potrebe geotehničkih laboratorijskih pokusa [4].

2.1.5. Obujamska težina

Obujamska težina (γ) je prema fizikalnoj definiciji jednaka umnošku gustoće (ρ) i ubrzanja sile teže (g), a izražava se u kN/m^3 :

$$\gamma = \rho \cdot g \text{ (izraz 10.)}$$

gdje je:

$$\rho = \frac{M}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \text{ i } g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ (izraz 11.)}$$

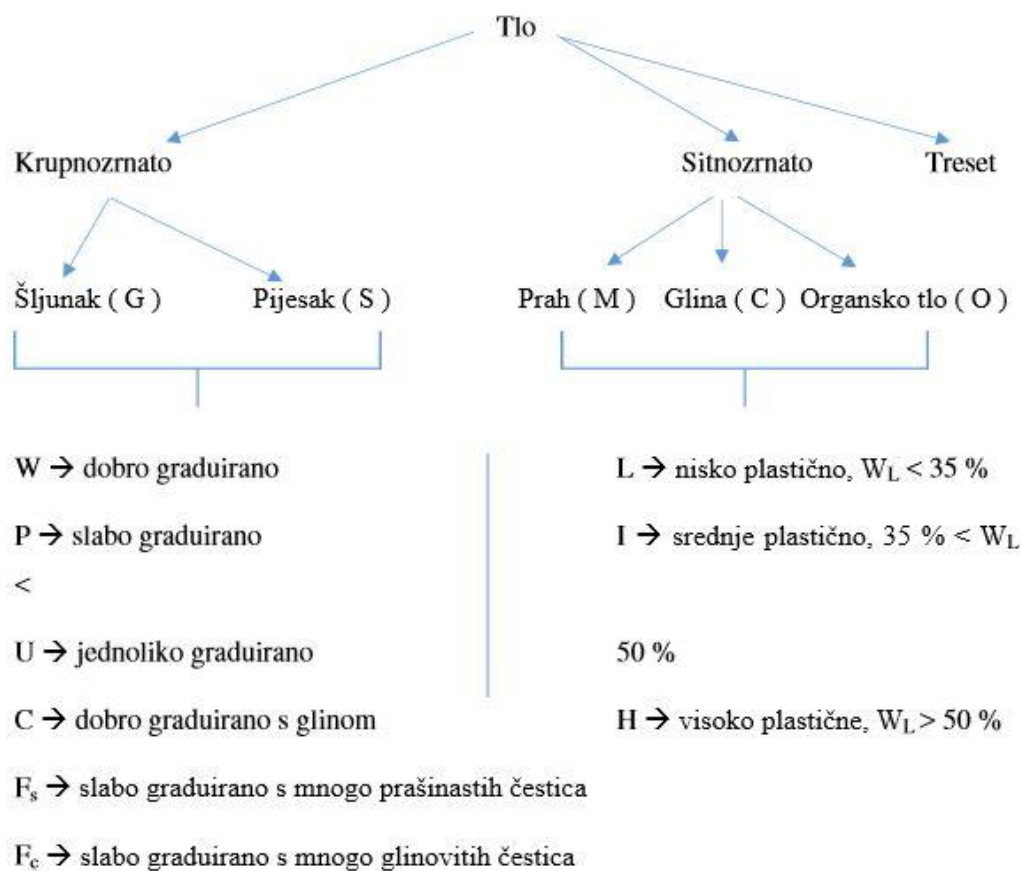
Gustoća svake pojedine komponente tla lako se odredi dijeljenjem mase određene komponente s njegovim volumenom, dok se gustoća suhog uzorka (ρ_d) dobiva iz omjera mase čvrstih čestica tla prema ukupnom volumenu uzorka tla. Množeći te gustoće s (g) dobiva se zapreminska težina za svaku željenu komponentu u uzorku tla. Uzimajući u obzir ove činjenice, kao i to da se u geotehničkoj praksi obujamska težina dovodi u usku vezu s relativnim porozitetom, koeficijentom pora, vlažnošću i stupnjem zasićenosti, proizlazi da zapreminska težina može biti suha (γ_d), vlažna (γ) i uronjena (γ'). Izrazi za određivanje ovih triju obujamskih težina, koji se u praksi najčešće upotrebljavaju, su sljedeći [4]:

- Obujamska težina suhog tla: $\gamma_d = (1 - n) \cdot \gamma$ (izraz 12.)
- Obujamska težina vlažnog tla: $\gamma = (1 - n) \cdot \gamma_s + S_r \cdot n \cdot \gamma_w$ (izraz 13.)

- Obujamska težina uronjenog tla: $\gamma' = (1 - n) \cdot (\gamma_s - \gamma_w)$ (izraz 14.)

2.2. Klasifikacija tla

Od do sada opisanih svojstava tla, granulometrijski sastav i Atterbergove granice tečenja i plastičnosti, prvo za krupnozrnata, a drugo za sitnozrnata tla, najpraktičniji su grubi pokazatelji ostalih mehaničkih svojstava tih tala. Zato je razvijeno nekoliko različitih klasifikacija tla u odnosu na te grube pokazatelje [5]. Kod nas se dugo koristila tzv. AC-klasifikacija tla (Slika 2) koja materijale dijeli prema veličini zrna, a sitnozrnate još i prema plastičnosti. Za nju je potrebno provesti relativno jednostavna laboratorijska ispitivanja kao što su sijanje, areometriranje i određivanje granica konzistencije. Kasnije su se pojavile još neke klasifikacije, koje su bile povezane s poznatim institucijama za standardizaciju kao što su DIN, British standard, AFNOR (Francuska) i ASTM (SAD) [4].



Slika 2. AC klasifikacija

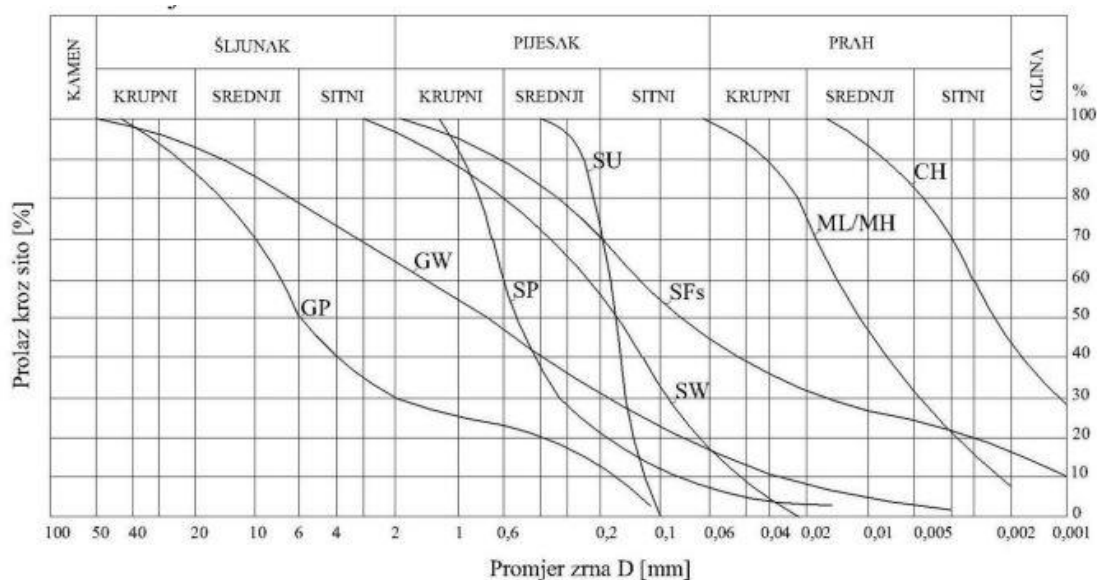
2.2.1. Granulometrijski sastav

Tokom nastanka tla na površini Zemlje razni su geološki činioci uzrokovali da ono sadrži zrna različite veličine i oblika. Sadržaj zrna različite veličine u određenoj količini tla izražen u postotku težine naziva se granulometrijski sastav. To je jedna od karakteristika koja pomaže da se ocjene osobine tla, a služi kao jedan od pokazatelja za klasifikaciju tla [2]. Određivanje granulometrijskog sastava možemo podijeliti na tri osnovna koraka: odabiranje reprezentativnog uzorka, dispergiranje agregata na konačne čestice, mjerenje mase pojedinih frakcija. Tlo je podijeljeno na osnovne kategorije na temelju svoje veličine zrna koja je prikazana u tablici (Tablica 1).

Tablica 1. Kategorije tla na temelju veličine zrna

Vrsta materijala		Promjer zrna	USCSBROJ SITA
Drobina (oblutci)			
ŠLJUNAK	krupan	60 mm	75 mm
	srednji	20 mm	
	sitan	6 mm	
		2 mm	4,75 mm No.4
PIJESAK	krupan	0,6 mm	
	srednji	0,2 mm	
	sitan	0,06 mm	0,075 mm No.200
PRAH	krupan	0,02 mm	
	srednji	0,006 mm	
	sitan	0,002 mm	
GLINA			

Analiza tla sijanjem provodi se isključivo kod krupnozrnatih materijala (šljunak, pijesak). Tlu koje sadrži sitnozrnate materijale nije moguće odrediti krupnoću sijanjem već se radi postupak aeometriranja odnosno taloženjem čestica različitih promjera u vremenu i promjenom gustoće suspenzije. Rezultat granulometrijske analize je granulometrijska krivulja. Teoretska krivulja prikazana na slici 3. Promjer D se prikazuje na Log skali da bi se dobio suvisli vizualni prikaz. Isti način prikazivanja koristi se za sve vrste granulometrijskih krivulja u građevinarstvu s tim da s u nekim slučajevima os apscisa obrne tako da skala promjera zrna raste dok u mehanici tla ova skala opada [1].



Slika 3. Teoretska granulometrijska krivulja

Bitne osobine granulometrijske krivulje mogu se izraziti pomoću efektivnog promjera zrna (D_{10}), koeficijenta jednolikosti (C_U) i koeficijenta zakrivljenosti (C_C), koji se računaju iz promjera zrna [1].

D_{10} – promjer sita kroz koje prođe 10 % ispitanog uzorka

D_{30} i D_{60} – promjer sita kroz koje prolazi 30 % odnosno 60 % ukupne količine uzorka

D_{10} – promjer efektivnog zrna

D_{60} – promjer dominantnog zrna

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ (izraz 15.) - koeficijent jednolikosti}$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \text{ (izraz 16.) - koeficijent zakrivljenosti}$$

2.2.2. Atterbergove granice

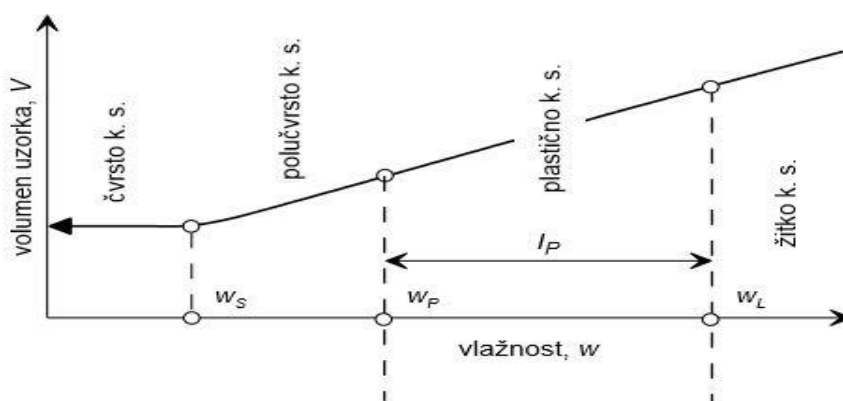
Fizikalna svojstva koherentnog tla (prašine i gline) mijenjaju se s promjenom sadržaja vode. O sadržaju vode ovisi konzistencija tla čije se aktualno stanje iskazuje pomoću indeksa konzistencije (I_C). Konzistentno stanje definira se pomoću granica konzistentnih stanja, koje je na temelju iskustva, postavio švedski geokemičar Albert Atterberg. Ove granice često se nazivaju i Atterbergove granice, a služe da se na indirektan način približe definiraju svojstva glinovitih komponenti tla. [4]

Granica stezanja (W_S) određena e sadržajem vlage pri kojem se postignuti volumen uzorka ne smanjuje pri daljnjem sušenju.

Granica plastičnosti (W_P) je ona minimalna vlažnost kod koje se valjčić uzorka tla promjera 3 mm još može plastično deformirati (bez da na površini nastanu pukotine).

Granica tečenja (W_L) određena je sadržajem vlage pri koje će uzorak tla početi teći ako ga se protrese.

Za ove granice postoje standardni laboratorijski postupci kojima se one određuju.



Slika 4. Atterbergove granice

Iz tih granica dalje možemo definirati konzistentno stanje materijala. Konzistentno stanje materijala podrazumijeva tlo u prirodnom stanju tj. s njegovom prirodnom vlažnosti (W_0). Ovisno o vlažnosti konzistentno stanje može biti čvrsto, polučvrsto, teško gnječivo i žitko.

Indeks plastičnosti je raspon vlažnosti unutar koje se tlo ponaša kao plastičan materijal. Indeks plastičnosti je vrlo značajna veličina. Veći indeks plastičnosti ukazuje na veću žilavost i veću suhu čvrstoću materijala. Ovo su osobine materijala s većim kohezijama, što ukazuje na materijale se većim specifičnim površinama odnosno na veću zastupljenost minerala glina u ukupnoj masi tla [2].

$$I_p = w_L - w_p \text{ (izraz 17.)}$$

Indeks konzistencije je odnos razlike granice tečenja i prirodne vlažnosti prema indeksu plastičnosti. Kada je jednak nuli, materijal je u prirodnom stanju na granici tečenja, kada je jednak 1, materijal je u prirodnom stanju na granici plastičnosti [2].

$$I_c = \frac{w_L - w_0}{I_p} \text{ (izraz 18.)}$$

Indeks tečenja gdje je (w_0) sadržaj vlage tla u prirodnom stanju. Indeks tečenja ima vrijednost 0 za tlo s vlažnošću na granici plastičnosti do 1 za tlo sa vlažnošću na granici tečenja. Za izrazito suho tlo on može biti manje od 0 (negativan), a za tlo sa prirodnom vlažnošću može biti veći od 1 [2].

$$I_t = \frac{w_0 - w_p}{I_p} \text{ (izraz 19.)}$$

3. Tlak porne vode uzrokovan promjenom naprezanja

Promjene pritiska na vodu u tlu rezultat su promjena u srednjim ukupnim i devijacijskim naprezanjima. Skempton (1954.) predložio je sljedeću jednadžbu za određivanje tlaka porne vode pod osnosimetričnim uvjetima [6] :

$$\Delta u = B [\Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \quad (\text{izraz 20.})$$

Tablica 2. A_f vrijednosti (vrijednost efektivnog naprezanja pri slomu)

Vrsta gline	A_f
Vrlo osjetljiva	0,75 do 1,0
Normalno konsolidirana	0,5 do 1
Kompaktna pješčana glina	0,25 do 0,75
Lagano prekonsolidirana glina	0 do 0,5
Kompaktna glina-šljunak	0,25 do 0,25
Jako prekonsolidirana glina	0,25 do 0,25

Gdje je $\Delta \sigma_3$ povećanje horizontalnog glavnog naprezanja, a $\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3$ je porast devijatorskog naprezanja, B je koeficijent koji ukazuje na razinu zasićenosti, a A je koeficijent dodatnog poreznog tlaka vode. Koeficijent B je 1 za zasićena tla i 0 za suha tla. Međutim, B nije izravno povezan s zasićenjem osim kod visokih vrijednosti zasićenosti ($S > 90 \%$) [6].

$$A = A_f = \left(\frac{\Delta u_q}{\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3} \right)_f \quad (\text{izraz 21.})$$

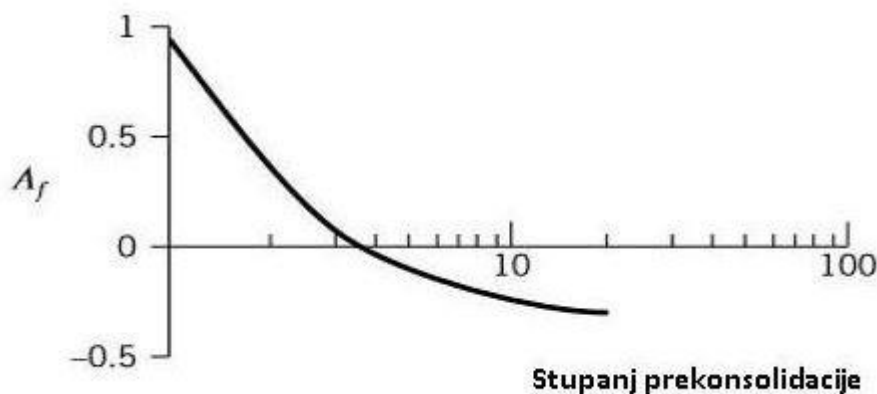
Δu_q je promjena dodatnog poreznog tlaka vode kao rezultat promjena u devijatorskim (posmičnim) naprežanjima. Eksperimentalni rezultati za A_f koje je prezentirao Skempton (1954.) prikazani su u tablici 2. Utvrđeno je da je koeficijent A ovisan o stupnju prekonsolidacije (OCR). Karakteristična varijacija A_f s OCR je prikazana na slici 5. Jednadžba (izraz 20.) je vrlo korisna u određivanju je li tlo zasićeno u odnosu na simetričnom testu. Ukoliko obje strane jednadžbe podijelimo s $\Delta \sigma_3$ dobit ćemo [6]:

$$\frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} = B \left[1 + A \left(\frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \sigma_3} - 1 \right) \right] \quad (\text{izraz 22.})$$

Tijekom izotropne konsolidacije, $\Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_1$ i jednažba (izraz 22.) postaje:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3} \text{ (izraz 23.)}$$

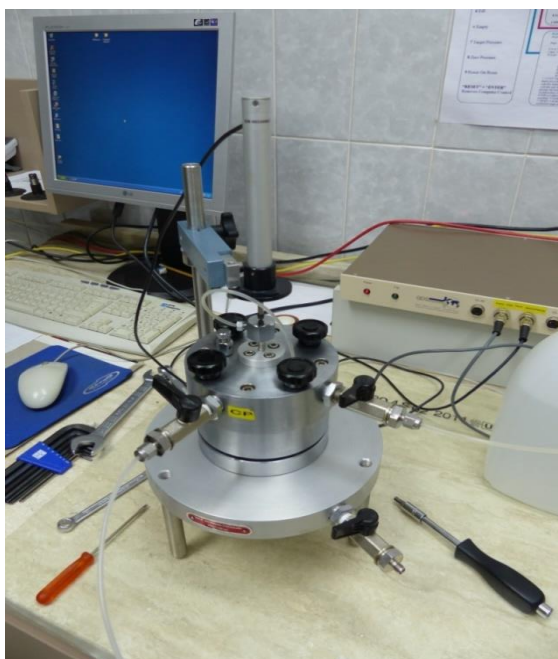
Ako je tlo zasićeno B će biti jednak jedan = 1, i Δu će biti jednako $= \Delta\sigma_3$. Drugim riječima, ako se poveća vertikalno opterećenje ili ćelijski pritisak $\Delta\sigma_3$, trenutni porast dodatnog poreznog tlaka mora biti jednak porastu vertikalnog opterećenja ili ćelijskog pritiska $\Delta\sigma_3$. Jednažba (izraz 23.) omogućava izračun (procjenu) razine zasićenja u uzorku tla u osnosimetričnom testiranju (ispitivanju). Koeficijenti A i B još se nazivaju i Skemptonovim koeficijentima poreznog tlaka [6].



Slika 5. Varijacija OCR-a s A_f (vrijednost efektivnog naprezanja pri slomu)

4. Hidraulički edometar

Hidraulički edometar (Slika 6) je laboratorijski uređaj koji se razlikuje od klasičnog edometra. U hidrauličkom edometru uzorak se opterećuje pomoću hidrauličkog tlaka koji se regulira pomoću specijalnih pumpi. Voda se u ćeliju dovodi preko tankog silikonskog crijeva koja puni gumenu membranu iznad uzorka i vrši pritisak na poroznu pločicu iznad uzorka koji se ravnomjerno prenosi na uzorak.



Slika 6. Hidraulički edometar



Slika 7. Hidrauličke pumpe

4.1. Dijelovi hidrauličkog edometra

- Hidraulički edometar sastoji se od postolja (Slika 8 gore lijevo). koje na dnu ima spojen uređaj kroz koji se regulira tlak, a sa strane ima regulirani dotok na koji se spoji hidraulička pumpa (Slika 7) za regulaciju pornog tlaka.
- Porozne pločice (Slika 8 dolje lijevo) stavljaju se jedna na postolje prije ugradnje uzorka na koju dolazi uzorak, a nakon ugradnje uzorka dolazi druga porozna pločica na uzorak.
- Metalni prsten u koji smo ugradili uzorak za ispitivanje.
- Veliki metalni prsten u kojeg ugrađujemo gumenu membranu.
- Gumena membrana omogućava prijenos pritiska vode na uzorak.
- Mali metalni prsten koji dolazi unutar membrane i osigurava da se voda iz membrane se ne miješa s vodom u uzorku.
- Metalni cilindar koji dolazi na veliki metalni prsten.
- Vijci kojima se cilindar pričvrsti za postolje kroz veliki metalni prsten
- Klip koji je u principu cijev kroz koji smo zasićivali uzorak.
- Mjerna sonda koja se namjesti na klip i očitava vertikalne pomake uzorka (Slika 8 gore desno).



Slika 8. Dijelovi hidrauličkog edometra

4.2. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar

Za uzorak smo uzeli zaglinjeni pijesak čija je stvarna gustoća čestica bila $\rho = 1,961 \text{ g/cm}^3$, a prirodna vlažnost $w = 15,57 \%$. Uzorak smo ugradili u metalni prsten hidrauličkog edometra (Slika 6) kojem smo najprije odredili volumen. Iz tablica 3. i 4. uzeli smo srednje vrijednosti promjera i visine prstena. Mjerenja su ponavljana više puta kako bi se smanjila ukupna pogreška volumena.

Tablica 3. Promjer prsten

Promjer prstena d [mm]	
d_1	63,40
d_2	63,41
d_3	63,36
d_4	63,38
d_5	63,38
d_6	63,37
d_7	63,38
d_8	63,45
D_{sr}	63,39

Tablica 4. Visina prstena

Visina prstena h [mm]	
h_1	19,14
h_2	19,10
h_3	19,08
h_4	19,13
h_{sr}	19,11

Volumen prstena smo izračunali pomoću izraza:

$$V = \frac{(63,39)^2 \cdot \pi}{4} \cdot 19,1125 = 60,31 \text{ cm}^3$$

Pomoću izračunatog volumena moguće je izračunati masu koja je potrebna za ugradnju uzorka u prsten hidrauličkog edometra:

$$m = \rho \cdot V = 1,961 \cdot 60,31 = 118,27 \text{ g}$$



Slika 9. Ugrađivanje uzorka u prsten hidrauličkog edometra

Nakon ugrađenog uzorka (Slika 9), prsten s uzorkom potrebno je ugraditi u hidraulički edometar (Slika 10). Prsten s uzorkom postavili smo na postolje hidrauličkog edometra i pažljivo počeli sastavljati ćeliju kako ne bi oštetili uzorak. Poslije uspješnog sastavljanja instrumenta u programu smo namjestili parametre i unijeli potrebne podatke te smo mogli početi s ispitivanjem.

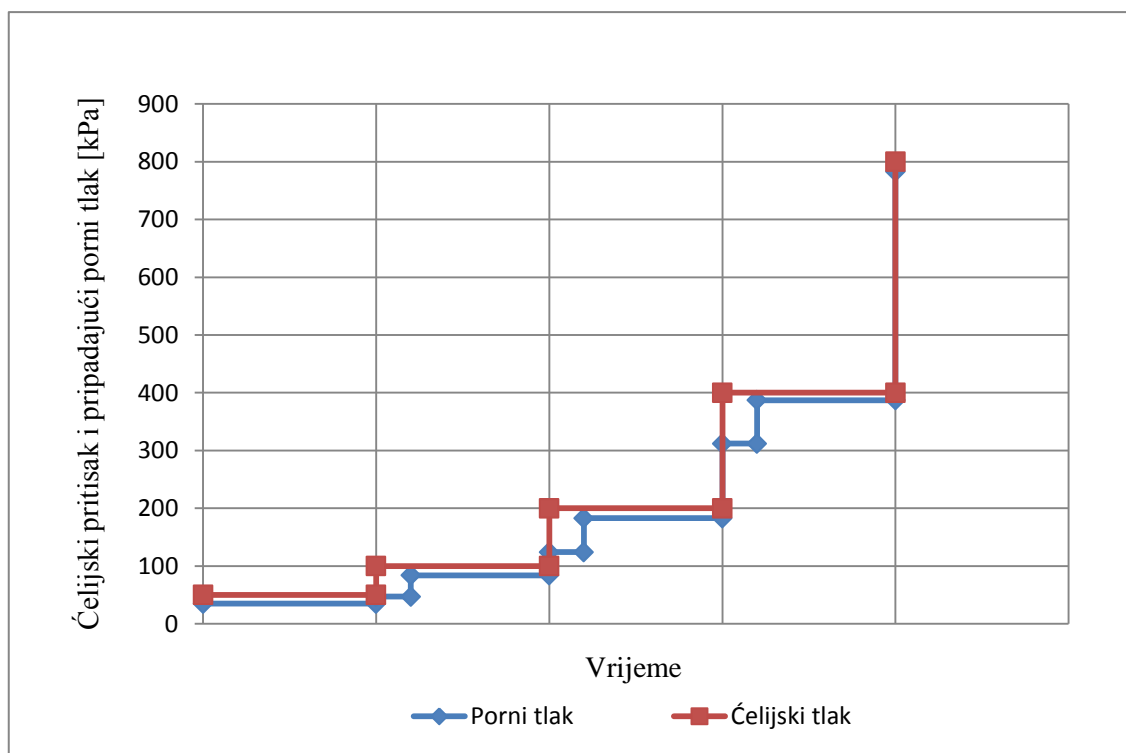


Slika 10. Postupak ugrađivanja uzorka u hidraulički edometar

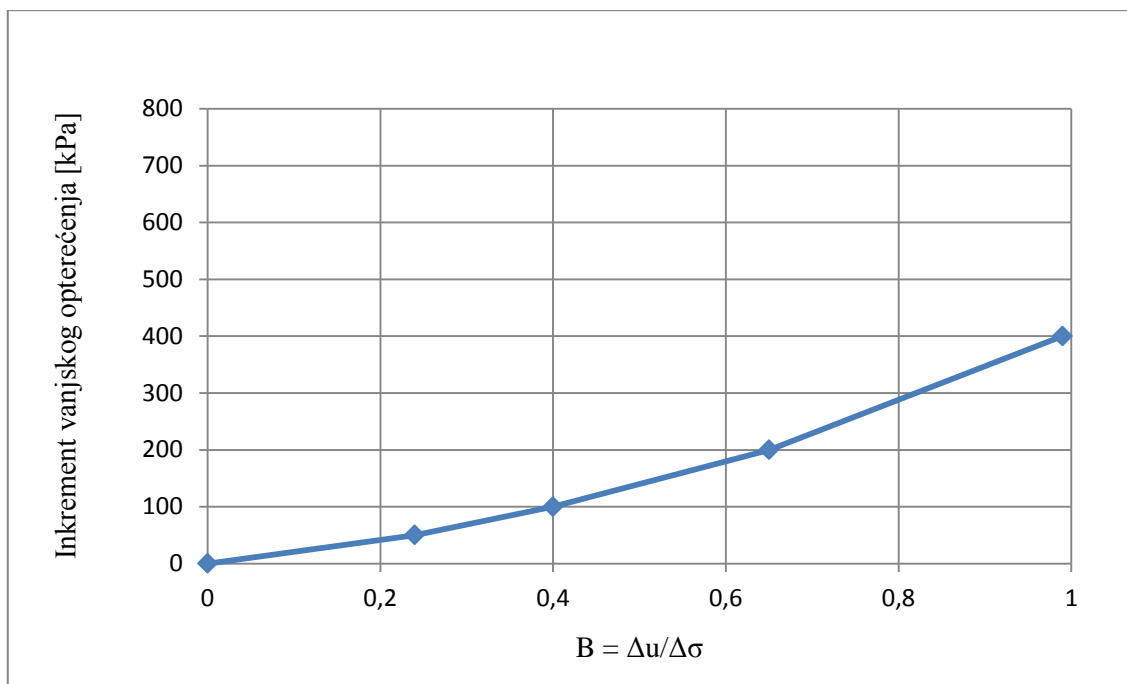
4.3. Rezultati ispitivanja

Prvi inkrement s kojim smo počeli opterećivati uzorak bio je 50 kPa, a svaki sljedeći je bio dvostruko veći od prethodnog. Uzorak je opterećivan do 800 kPa (Slika 11). Prije nego što smo krenuli s „pravim“ opterećenjima uzorak smo postepeno opterećivali s malim opterećenjima od 4 kPa dok se nije ustabilio. Prvo normalno opterećenje od kud kreće ispitivanje bilo je s 50 kPa na 100 kPa, odnosno 50 kPa. Za inkrement opterećenja od 50 kPa porni pritisak je narastao za 12 kPa, iz čega slijedi da je kod prvog opterećenja uzorak uorak pokazao zasićenost od 24 % odnosno Skemptonov parametar B iznosio je 0,24. Kako skemptonov B parametar nije bio blizu 1 odnosno uzorak nije zasićen, pomoću pumpe smo mu povećali porni pritisak na 95 kPa prije nego što smo krenuli s drugim inkrementom opterećivanja (Slika 11). Kada se porni tlak ustabilio krenuli smo u drugu fazu opterećivanja. S 100 kPa na 200 kPa, odnosno opterećenje je iznosilo 100 kPa, (duplo veće od prethodnog). Za ovaj inkrement opterećenja porni tlak

je porastao za 40 kPa iz čega slijedi da je, stupanj saturacije bio na 40 %. Također smo nakon ovog opterećenja povećali porni pritisak u uzorku na 195 kPa. Nakon nekog vremena kada se uzorak umirio krenuli smo u treću fazu opterećivanja. Povećali smo opterećenje za 200 kPa, s 200 kPa na 400 kPa.. Porast pornog tlaka u ovom inkrementu iznosio je 129 kPa te je stupanj zasićenosti sada iznosio 65 %. Ponovno smo mu pomoću pumpe povećali porni pritisak na 395 kPa. Četvrta faza je bila ujedno i zadnja faza opterećivanja uzorka. Opterećenje je bilo 400 kPa, s 400 kPa na 800 kPa, a istovremeno je porni pritisak porastao za 396 kPa te je utvrđeni stupanj zasićenosti uzorka iznosio gotovo 99 %, odnosno Skemptonov parametar je bio 0,99 (Slika 12). Skemptonov parametar B jednak 1, u praksi je dosta teško postići pa se sve iznad 0,95 smatra zasićenim.



Slika 11. Prikaz rasta pornog tlaka i povećanjem opterećenja



Slika 12. Postupak zasićivanja uzorka po inkrementima

5. Zaključak

Hidrauličkim edometrom za razliku od klasičnih edometara omogućeno nam je obostrano mjerenje i regulacija pornog tlaka (tzv. „pore pressure“), volumne deformacije, aksijalne deformacije, aksijalnog naprezanja.

U ovom radu demonstriran je postupak zasićivanja uzorka u hidrauličkom edometru. Pokazano je da je hidrauličkim edometrom moguće postići visok stupanj zasićenja. Također treba uočiti da je visok stupanj zasićenja moguće postići tek pri značajnijim iznosima pornog pritiska (više od 300 kPa). Nadalje, treba napomenuti da postupak zasićivanja uzorka treba provoditi vrlo pažljivo kako tijekom zasićivanja uzorka ne bi došlo do konsolidacije uzorka.

6.Literatura

1. Roje – Bonacci, T.: Mehanika tla, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2003.
2. Nonveiller, E.: Mehanika tla i temeljenje graevina, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Školska knjiga, Zagreb 1979.
3. https://www.grad.unizg.hr/download/repository/2._Predavanje_MT.pdf
(datum pristupa 05.06.2017.)
4. Strelec S., Štuhec D. Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011
5. https://www.grad.unizg.hr/download/repository/3._Predavanje_MT.pdf
(datum pristupa 03.06.2017.)
6. Budhu, M.: Soil Mechanics & Foundations, 3rd edition, John Wiley & Sons, New York, 2000.

7. Popis slika

Slika 1. Trodjelni sustav

Slika 2. AC klasifikacija

Slika 3. Teoretska granulometrijska krivulja

Slika 4. Atterbergove granice

Slika 5. Triaksijalno opterećen cilindar

Slika 6. Hidraulički edometar

Slika 7. Hidrauličke pumpe

Slika 8. Dijelovi hidrauličkog edometra

Slika 9. Ugrađivanje uzorka u prsten hidrauličkog edometra

Slika 10. Postupak ugrađivanja uzorka u hidraulički edometar

Slika 11. Prikaz rasta prsnog tlaka i povećanjem opterećenja

Slika 12. Postupak zasićivanja uzorka po inkrementima

8. Popis tablica

Tablica 1. Kategorije tla na temelju veličine zrna

Tablica 2. A_f (vrijednost efektivnog naprežanja pri slomu), vrijednosti

Tablica 3. Promjer prstena

Tablica 4. Visina prstena